



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Interazione onda struttura in un dispositivo di conversione dell'energia da onda a tracimazione e problematiche progettuali

Vicinanza, D.; Margheritini, Lucia; Zanuttigh, B.; Castagnetti, Mirko; Contestabile, Pasquale

Published in:
XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche

Publication date:
2010

Document Version
Accepted author manuscript, peer reviewed version

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Vicinanza, D., Margheritini, L., Zanuttigh, B., Castagnetti, M., & Contestabile, P. (2010). Interazione onda struttura in un dispositivo di conversione dell'energia da onda a tracimazione e problematiche progettuali. In *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche: Palermo, Italy, 14-17 September 2010* XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

INTERAZIONE ONDA STRUTTURA IN UN DISPOSITIVO DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA DA ONDA A TRACIMAZIONE E PROBLEMATICHE PROGETTUALI

*D. Vicinanza¹, L. Margheritini², B. Zanuttigh³,
Mirko Castagnetti³ & Pasquale Contestabile¹*

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università degli Studi di Napoli, Italia, email: diego.vicinanza@unina2.it, pasquale.contestabile@unina2.it
(2) Department of Civil Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark, email: lm@civil.aau.dk
(3) Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italy, barbara.zanuttigh@unibo.it, mirko.castagnetti@libero.it

SOMMARIO

Il presente lavoro riassume i risultati inerenti l'interazione delle onde con un innovativo cassone frangiflutti per la produzione d'energia elettrica denominato Seawave Slot-cone Generator (SSG). Il funzionamento dell'SSG è basato sul noto principio della tracimazione e della conservazione dell'energia potenziale mediante realizzazione di un carico idraulico in serbatoi a diversi livelli. La configurazione analizzata consta di tre serbatoi ed è stata sottoposta a diverse campagne di prove sperimentali presso il laboratorio dell'Università di Aalborg (Danimarca). Gli esiti delle prove di laboratorio - comprendenti i carichi sulla struttura, le portate di tracimazione misurate ai serbatoi e la riflessione al piede dell'opera - sono stati confrontati con metodi di letteratura.

1 INTRODUZIONE

Il progresso tecnologico, l'esaurirsi delle risorse fossili, i continui mutamenti climatici dovuti all'inquinamento incontrollato hanno portato ad elaborare modi diversi di produrre energia da impiegare per lo sviluppo sociale ed economico. È stato calcolato che il mare contiene tra gli 8.000 e gli 80.000 TWh/y, un'energia che, debitamente convertita, potrebbe soddisfare una quantità variabile tra il 10 ed il 50% del fabbisogno elettrico mondiale. Inoltre la fonte di energia ondosa presenta minori fluttuazioni temporali rispetto a quella solare o a quella eolica e quindi ben si presta per coprire in maniera continua una fetta di fabbisogno energetico. Il problema di tutti i convertitori di energia ondosa (WECs) è catturare l'energia ondosa con una tecnologia affidabile e dai costi contenuti. Una recente proposta, alquanto interessante, è stata prospettata dalla WAVEnergy AS Company (www.waveenergy.no), fondata nell'Aprile 2004 per lo sviluppo del Seawave Slot-cone Generator (SSG).

L'SSG è un dispositivo capace di convertire l'energia ondosa in energia elettrica sfruttando il principio della "tracimazione", mediante l'impiego di tre vasche posizionate una sull'altra, nelle quali viene serbata l'energia potenziale dell'onda.

L'acqua, così catturata, attraversa poi le turbine multi-stadio per la produzione di elettricità. Il sistema di riserve multiple permette di ovviare all'irregolarità delle onde, costituendo una maggiore continuità nel rilascio dell'energia, con la riduzione drastica di regimi transitori tra una fase di ricarica e l'altra. Ne risulta una elevata stabilità di produzione, una maggiore vita tecnica del complesso generatore-turbina ed una efficienza globale superiore all'impiego di una singola struttura (Vicinanza *et al.*, 2006).

Obiettivo di questo lavoro è riassumere i principali risultati sperimentali ottenuti sia in canale sia in vasca in merito al comportamento del dispositivo soggetto ad onde. Si presentano i risultati relativi alle forze agenti, alla tracimazione ottenibile variando la geometria dei serbatoi dell'SSG e infine la riflessione indotta al piede dell'opera. I risultati sono confrontati con formule di letteratura e criticamente elaborati al fine di provvedere conclusioni in merito alla progettazione di tali dispositivi.

2 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

2.1 Prove in vasca

I carichi ondosi possono essere stimati tramite l'esperienza acquisita nella progettazione delle costruzioni marittime ma le differenze tra le strutture sono troppo accentuate da assicurare che tale stima goda buona approssimazione. Pertanto, relativamente all'analisi della risposta strutturale, si sono eseguite due set di prove, una riguardante le pressioni (Vicinanza *et al.*, 2006; Vicinanza & Frigaard, 2008); l'altra riguardante le forze, utile invece per l'analisi di stabilità (Vicinanza *et al.*, 2008). Il modello testato è stato realizzato presso l'Università di Aalborg, in scala 1:60. La vasca ondogenica ha dimensioni 15,7 x 8,5 x 1,5 m. Il generatore d'onda è costituito da un totale di dieci azionatori del tipo "a pistone". Per minimizzare la riflessione, le onde sono assorbiti da una scogliera inclinata nella parte posteriore del bacino.

L'esemplare in scala di SSG è stato sviluppato in plexiglass con una dimensione di 0,471 x 0,179 m (Fig. 1). Le tre pareti inclinate, costituenti il paramento frontale, sono state posizionate con una inclinazione di $\alpha = 35^\circ$. Per simulare al meglio il prototipo, presumendo originariamente una fondazione su pali in roccia, il modello è stato fissato rigidamente al fondo.



Figura 1. Settaggio della batimetria e del modello nel primo set di prove.

Nel primo set-up di prove sono state impiegate 14 celle di pressione, per misurare le pressioni su un totale di 25 posizioni (Fig. 2), dettagli in *Vicinanza et al.* (2006). La Tab. 1 mostra gli stati di mare Jonswap realizzati, ciascuno di circa 1000 onde.

Nella secondo set-up di prove, volendo investigare la stabilità generale del prototipo, che intanto fu riconvertito ad “opera a gravità”, ovvero non più con fondazione su pali ma semplicemente appoggiato sul basamento roccioso, sono stati impiegati una cella triassiale per la misura delle forze agenti nelle tre dimensioni, ed un “T-bone” (dinamometro) per la misura dei momenti (Fig. 3).

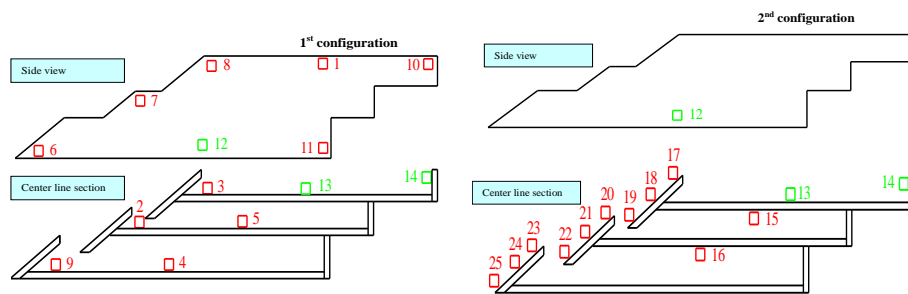


Figura 2. Configurazioni delle prove e posizioni delle celle di pressione.

Test	H_s [m]	T_p [s]	swl [m]	Direction	Wave field	Test	H_s [m]	T_p [s]	swl [m]	Direction	Wave field	n
1	0.125	1.55	0.50	Front	2D	17	0.125	1.55	0.53	Front	3D	4
2	0.167	1.81	0.50	Front	2D	18	0.167	1.81	0.53	Front	3D	4
3	0.208	1.94	0.50	Front	2D	19	0.208	1.94	0.53	Front	3D	4
4	0.250	2.07	0.50	Front	2D	20	0.250	2.07	0.53	Front	3D	4
5	0.042	1.03	0.50	Side	2D	21	0.042	1.03	0.53	Side	3D	4
6	0.083	1.29	0.50	Side	2D	22	0.083	1.29	0.53	Side	3D	4
7	0.125	1.55	0.50	Side	2D	23	0.125	1.55	0.53	Side	3D	4
8	0.167	1.81	0.50	Side	2D	24	0.167	1.81	0.53	Side	3D	4
9	0.125	1.55	0.53	Front	2D	25	0.125	1.55	0.53	Front	3D	10
10	0.167	1.81	0.53	Front	2D	26	0.167	1.81	0.53	Front	3D	10
11	0.208	1.94	0.53	Front	2D	27	0.208	1.94	0.53	Front	3D	10
12	0.250	2.07	0.53	Front	2D	28	0.250	2.07	0.53	Front	3D	10
13	0.042	1.03	0.53	Side	2D	29	0.042	1.03	0.53	Side	3D	10
14	0.083	1.29	0.53	Side	2D	30	0.083	1.29	0.53	Side	3D	10
15	0.125	1.55	0.53	Side	2D	31	0.125	1.55	0.53	Side	3D	10
16	0.167	1.81	0.53	Side	2D	32	0.167	1.81	0.53	Side	3D	10

Tabella 1. Sommario delle condizioni ondose sul modello. “Side” è l’attacco a 45°, realizzato mediante una rotazione completa del modello nella vasca.

2.2 Prove in canale

Le prove sono state effettuate nel canale ad acque basse provvisto di battonde presso l'Università di Aalborg. Detto canale, il quale misura 25 m di lunghezza per 1,5 m di larghezza ed 1 m di profondità, è dotato di un generatore d’onda a pistone con una corsa di circa 0,7 m. Il software utilizzato per il controllo del sistema di generazione delle onde di tipo regolare e irregolare è AwaSys (Aalborg, 2007a,b).

Il modello del dispositivo SSG, di larghezza 0.514 m, è costituito da 3 lastre di metallo piane, inclinate di 35° rispetto l'orizzontale (Fig. 4). Di fronte al dispositivo è presente una rampa di legno che congiunge lo stesso al fondo della vasca, di 0.89 m di lunghezza ed inclinata anch'essa di 35° (angolo ottimale per massimizzare la tracimazione dell'onda sulla struttura). La struttura è limitata lateralmente da due pareti di legno di circa 2 m di lunghezza al fine di guidare l'onda ed evitare effetti di riflessione spuria ai lati della struttura. Le piastre del dispositivo SSG possono essere rimosse per variare il numero di serbatoi da uno a tre e possono scorrere una rispetto all'altra così da modificare l'ampiezza delle bocche (con riferimento alla Fig. 4, le dimensioni HD1 e HD2). La maggior parte delle prove sono state effettuate con due serbatoi, pertanto i risultati saranno presentati solo per questa configurazione. In particolare si sono prese in esame 13 diverse geometrie, caratterizzate da $0.30\text{m} < \text{HD1} < 0.053\text{m}$ pur mantenendo fissi i livelli di cresta delle bocche R_{c1} e R_{c2} , rispettivamente a 0.033 m e 0.072 m rispetto il fondo della vasca.

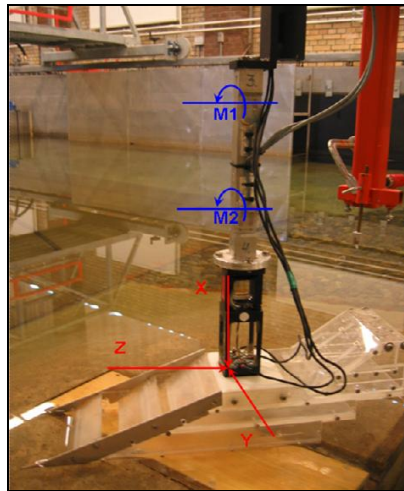


Figura 3. Settaggio del modello nel secondo set di prove.

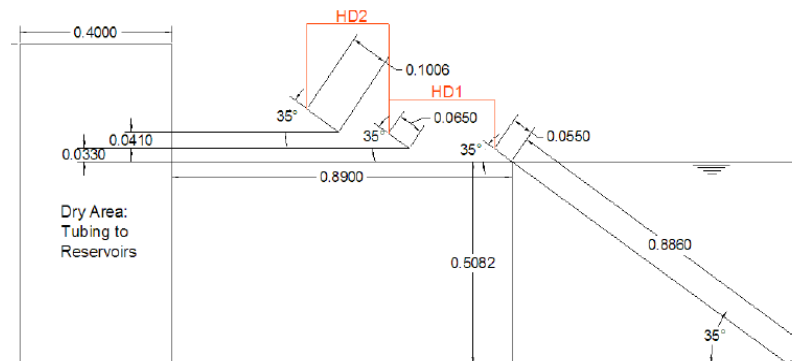


Figura 4. Schema dell'SSG e geometria del modello.

Per testare le condizioni d'attacco più comuni del Mare del Nord, sono state scelte (Tab. 2) le condizioni ondose W1, W2, W3 e W4 (aventi una probabilità di accadimento superiore al 5%). L'altezza delle onde H_{m0} è nell'intervallo 0.03-0.13 m e la profondità d'acqua è stata mantenuta costante $h=0.51$ m. Per indagare l'effetto della pendenza dell'onda si sono variati i valori di T_p all'interno di altre condizioni d'attacco ondoso (W1A; W2A, b; W3b, c; W4B, c). Gli attacchi ondosi sono irregolari con spettro Jonswap. Le onde generate sono state misurate con tre sonde di fronte al modello, la più vicina delle quali posta a 1.96 m dal dispositivo. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con una frequenza di 50 Hz. Per l'analisi delle onde si è adoperato il software WaveLab sviluppato presso l'Università di Aalborg (2007b), adottando il metodo di Mansard e Funke (1980).

Onda	H_{m0} [m]	T_p [s]	Onda	H_{m0} [m]	T_p [s]
W1	0.03	1.02	W1a	0.03	2.07
W2	0.07	1.28	W2a	0.07	2.92
			W2b	0.07	0.92
W3	0.10	1.53	W3b	0.10	1.13
			W3c	0.10	2.53
W4	0.13	1.79	W4b	0.13	1.31

Tabella 2. Attacchi ondosi al dispositivo SSG. Onde irregolari con spettro Jonswap.

3 ANALISI DELLE FORZE PER PROVE IN VASCA

Le serie temporali dei carichi agenti sulle pareti frontale e posteriore evidenziano che (Vicinanza *et al.*, 2006)

- le pressioni generate non subiscono sostanziali variazioni tra una parete inclinata e l'altra;
- l'applicazione del carico è di tipo “*pulsating*”
- sulla parete verticale posteriore della vasca superiore si ha una rapida variazione nel tempo ed un'alta pressione di picco, caratteristiche tipiche degli eventi di tipo “*impact*”.

I risultati sembrano indicare che le pressioni quasi-statiche ($P_{1/250} \sim \rho_w g H_{max}$) o *pulsating* sono generate dalle onde non frangenti (Tabella 3). I carichi sulla parete verticale posteriore variano oltre 2 - 3 $\rho_w g H_{max}$. In tal caso l'onda sta collassando sulla parete della vasca superiore ed ha una pressione di impatto relativamente modesta (per gli effetti di dissipazione energetica).

Per l'analisi delle misure di pressione è necessario usare la scala di Froude dai valori del prototipo, conversione realistica in caso d'onda *pulsating*, mentre appare meno semplice la conversione per l'onda impattante (Oumeraci *et al.*, 1999).

I risultati sperimentali mostrano pressioni del 20–50% superiori a quelle ottenute con il metodo di previsione Takahashi *et al.* (1994). Questa discrasia può attendibilmente ritenersi dovuta alla tipologia del modello di SSG testato, che prevedeva una installazione fissa su pali in roccia, tale da ritenersi “infinitamente rigida” mentre, d'altra parte, la formulazione di Takahashi *et al.* (1994) si basa su osservazioni di un modello “a gravità”. Di questa stessa tipologia è, invece, il modello di SSG nel secondo set di prove, modifica resasi necessaria a seguito di sopravvenute

esigente progettuali. Confrontando i dati di forze ottenuti in tali prove rispetto alle forze calcolate tramite integrazione dei dati di pressione registrate nel primo set di prove, si è rilevato che queste ultime superano nettamente le forze misurate direttamente mediante la cella triassiale ed il T-bone. L'entità della discrasia varia da caso a caso, a seconda della profondità, spreading e obliquità. Per quanto riguarda il caso di attacco d'onda frontale, si può definire mediamente una diminuzione di circa 1,5 volte. Tale valore risulta confrontabile con la discrasia valutata tra le pressioni misurate nei primi set di prove e le pressioni calcolate con la formula di *Takahashi et al.* (1994) ottenuto su modello dinamico. Ciò avvalorava l'ipotesi fatta relativamente alle cause di queste differenze.

Plate	Sampling rate(Hz)	Tdx	1	2	3	4
			$p_{1/250}$ (kN/m ²)	$p_{1/250}$ (kN/m ²)	$p_{1/250}$ (kN/m ²)	$p_{1/250}$ (kN/m ²)
9	1200	14	5.16	5.51	7.84	9.74
3	200	17	0.86	1.37	1.48	2.15
	200	18	1.47	2.60	3.02	4.19
	200	19	1.44	2.30	2.44	2.90
2	200	20	1.49	2.08	2.37	3.03
	200	21	1.87	2.70	2.92	3.67
	200	22	1.12	1.55	1.65	1.89
1	200	23	1.05	1.56	2.31	2.53
	200	24	1.40	2.07	2.28	2.83
	200	25	1.61	2.43	2.49	3.31

Tabella 3 Sommario delle pressioni 1/250 sul modello.

4 ANALISI DELLA TRACIMAZIONE

I principali parametri geometrici per dimensionare la struttura SSG sono: l'angolo d'inclinazione del paramento lato-mare della struttura (α); la quota di ciascun serbatoio rispetto al medio mare ($R_{c,n}$); la distanza verticale tra i singoli serbatoi (Δz).

Studi precedenti (*Kofoed*, 2002; *Margheritini et al.*, 2009) relativi al processo di tracimazione con un solo serbatoio hanno evidenziato:

- la modesta dipendenza della portata di tracimazione q_t dall'angolo d'inclinazione della rampa α , che ha portato a definire una inclinazione ottimale $\alpha_m=30^\circ$. Per angoli di rampa differenti da quello ottimale, il coefficiente λ_α è così definito:

$$\lambda_\alpha = \cos^3(\alpha - \alpha_m) \quad (1)$$

- la dipendenza della q dalla quota della cresta relativa $R = R_c/H_s$:

$$\lambda_s = \begin{cases} 0.4 \sin\left(\frac{2\pi}{3}R\right) + 0.6 & \text{se } R < 0.75 \\ 1 & \text{se } R > 0.75 \end{cases} \quad (2)$$

- che la q è ben rappresentata dalla espressione esponenziale di *Van der Meer & Janssen* (1995), introdotti i fattori correttivi (1) e (2):

$$q = \lambda_{dr} \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot \frac{A}{B} \cdot e^{\frac{C \cdot R_{c1}}{H_s}} \cdot (e^{\frac{B \cdot z_2}{H_s}} - e^{\frac{B \cdot z_1}{H_s}}) \quad (3)$$

dove $z_1 = R_{c,n}$ e $z_2 = R_{c,n+1}$.

Le prove condotte sul modello a due serbatoi suggeriscono che la variabile HD, cioè la distanza orizzontale tra le creste dei serbatoi, influenza sia q sia la potenza di tracimazione, nonché, di conseguenza, l'efficienza idraulica. La Fig. 5 evidenzia come non sia scontato che ad un aumento dell'altezza d'onda significativa H_s corrisponda un aumento della portata di tracimazione al primo serbatoio Q_{1mis} poiché, oltre un valore limite, si verifica un appiattimento dovuto all'ingresso dell'acqua nel secondo serbatoio. Questo effetto è tanto più marcato quanto minore è HD. Valori di HD > 11 cm producono maggiori costi di costruzione a fronte di minor rese energetiche poiché minore sarà la portata tracimata nel secondo serbatoio. Valori di HD < 11 cm riducono i tassi di tracimazione misurati al primo serbatoio, con efficienze idrauliche modeste sotto le condizioni d'onda di progetto.

La formula (3) tende a sottostimare le Q_{1mis} per HD grandi (HD= 15, 20 o 30 cm) ed a sovrastimarle nel caso di HD piccoli (HD = 5,32 cm). Viceversa avviene per le portate del secondo livello Q_{2mis} , mentre solo una serie (relativa ad HD=8 cm) valida abbastanza bene la formula. Il confronto tra la portata totale misurata (somma della Q_{1mis} e Q_{2mis}) e calcolata, eq. (3), è riportato in Fig. 6.

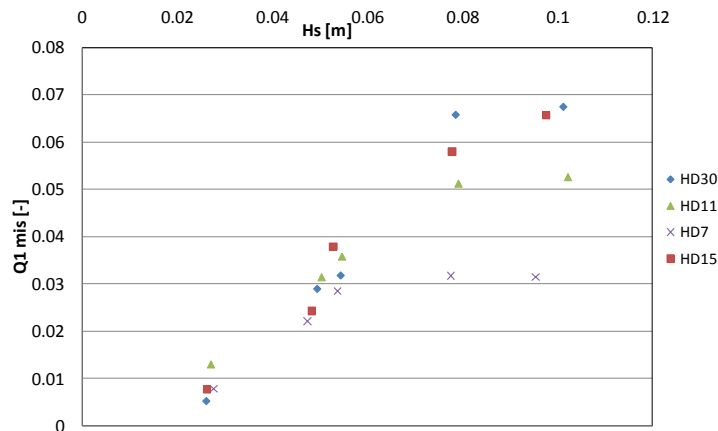


Figura 5. Dipendenza della portata di tracimazione misurata con l'altezza d'onda significativa H_s e per diversi valori del parametro HD.

5 ANALISI DELLA RIFLESSIONE

In letteratura il coefficiente di riflessione K_r dipende in molti lavori dal solo parametro di Iribarren e Battjes ξ ; tra i più recenti, Zanuttigh & Van der Meer (2008) propongono la formula

$$K_r = \tanh(a \cdot \xi_o^b) \quad (4)$$

dove a e b dipendono dal fattore di scabrezza γ_f relativo alla formula per il calcolo della portata tracimante (per strutture impermeabili, come in questo caso, $a=0.16$, $b=1.43$) e

$$\xi_o = \tan \alpha / \sqrt{H_{m0}/L_0} \quad (5)$$

dove $\tan \alpha$ è la pendenza del paramento lato mare, H_{m0} è l'altezza d'onda significativa e L_0 è la lunghezza al piede dell'opera, calcolata a partire dal periodo spettrale $T_{m-1,0}$.

Nel caso di una pendenza composta, diventa cruciale quale sia la corretta pendenza da inserire nella valutazione del parametro (5) hanno evidenziato che

- il valore più importante di pendenza da tenere in conto per la riflessione è quella al di sotto del livello del mare;
- la riflessione d'onda è influenzata dal frangimento e dalla risalita ondosa;
- si può rappresentare la pendenza media della struttura tramite le seguenti

$$\xi_o = \frac{[\tan \alpha_d \cdot (h - 1.5H_{m0}) + \tan \alpha_{inc} \cdot 1.5H_{m0}]/h}{\sqrt{H_{m0t}/L_0}} \quad (6)$$

$$\xi_o = \tan \alpha_{incl} / \sqrt{H_{m0}/L_0}$$

dove la seconda espressione è usata solamente quando il fondale è minore di $1.5H_{m0}$. Nella eq. (6) h è il fondale, α_d è la pendenza del paramento lato mare al di sotto della zona di *run-up* e *run-down* (dal fondo fino a $h-1.5H_{m0}$).

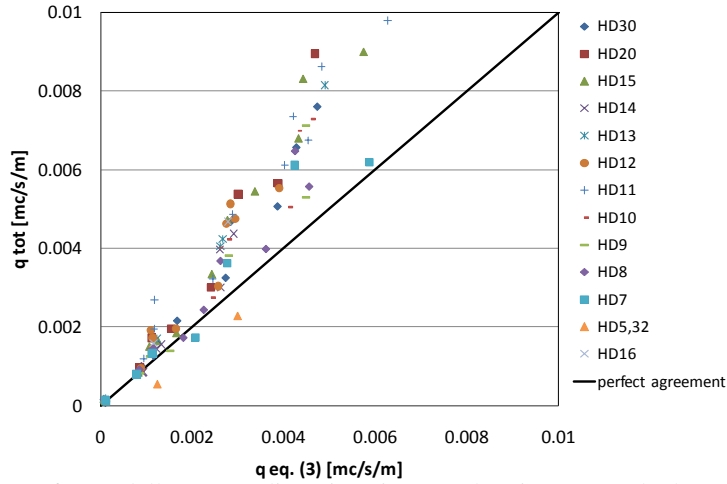


Figura 6. Confronto della portata di tracimazione totale misurata e calcolata (3).

Nel caso di un dispositivo SSG, i cambiamenti di pendenza del profilo sono dovuti alle bocche del serbatoi: mano a mano che le onde ricadono in essi non possono produrre alcuna riflessione sulla parte superiore del profilo SSG. E' quindi necessario (Zanuttigh *et al.*, 2009) introdurre un fattore di riduzione, che tenga conto almeno dell'acqua persa nel primo serbatoio, il quale è sempre situato nella zona della risalita:

$$R = \frac{R_{c1} - R_{c2} + HD_1 + h}{R_{c1} + HD_1 + h} \quad (7)$$

L'uso delle equazioni (4)+(5)+(6)+(7) consente di derivare K_r con uno scarto quadratico medio del 6.3% ed un indice di Wilmot (1981) I_w del 91.4%, si veda Fig. 7.

Finora ci siamo solamente concentrati sulla capacità di previsione delle formule esistenti. Un ulteriore aspetto, non certo meno importante all'interno di questa analisi,

sta nel considerare che la riflessione ondosa indotta dal dispositivo SSG è sempre molto elevata: K_r non è mai inferiore al 50% con media pari al 68%.

Il K_r in presenza di frangiflutti a gettata tradizionali si attesta intorno al 30-40%, mentre nel caso di dighe a cassoni o parete verticale è compresa tra circa il 45% ed il 90%, valori peraltro molto prossimi a quelli ottenibili da un dispositivo di tipo SSG. In entrambi i casi, sia per opere a gettata, sia per dighe a parete verticale, il corretto posizionamento di una protezione al piede assieme all'impiego di celle e pareti perforate permettono di ridurre la riflessione ondosa e l'erosione localizzata al piede causata dalla riflessione stessa.

Nel caso dell'SSG, la protezione al piede deve soddisfare due compiti principali: non deve essere troppo elevata (quanto a livello di cresta) per non indurre al frangimento le onde e quindi dissipare energia (preziosa per determinare la risalita e quindi per la conversione). D'altro canto occorre garantire la stabilità della struttura, evitando meccanismi di collasso che possono essere indotti "dall'erosione vicina" causata dalla riflessione (Tanimoto *et al.*, 1976; Van der Meer *et al.*, 1995; Takahashi, 1996; Sumer *et al.*, 2005).

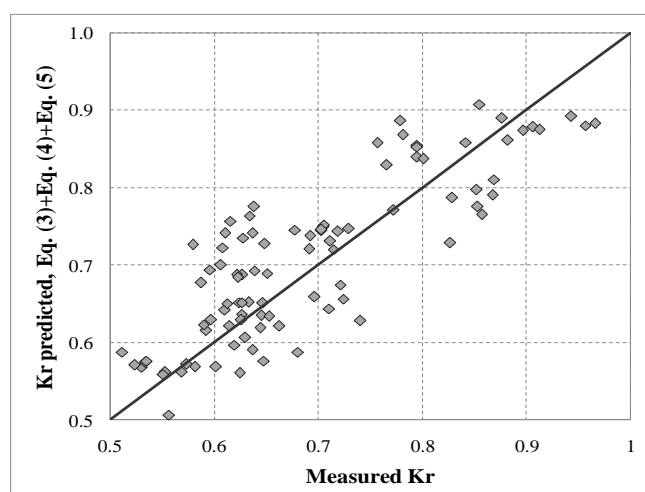


Figura 7. Coefficiente di riflessione misurato e stimato mediante la formula di Zanuttigh & Van der Meer (2008) con l'inclusione della eq. (6) e (7).

6 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato studiato il cassone frangiflutti SSG per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica basato sul principio di tracimazione.

La formula di Takahashi *et al.* (1994) per valutare le pressioni sui paramenti inclinati dell'SSG non è direttamente applicabile alla struttura testata ma è di certo lo strumento di ingegneria, tra quelli presenti in letteratura, che meglio descrive il fenomeno in esame. I risultati sperimentali mostrano pressioni del 20-50% superiori a quelle ottenute con il metodo di previsione Takahashi *et al.* (1994) per struttura "infinitamente rigida" mentre le prove dinamiche danno risultati confrontabili con

Takahashi et al. (1994).

Il processo di tracimazione sul dispositivo è influenzato dalle sue caratteristiche geometriche, in particolare dalla pendenza del paramento, dal numero di serbatoi presenti e dalle loro dimensioni (ampiezza ed altezza della bocca rispetto al medio mare). La equazione (3), desunta da *Kofoed* (2002), non rappresenta l'effetto della diversa ampiezza delle bocche dei serbatoi.

La riflessione indotta da un dispositivo SSG è sempre molto elevata: K_r non è mai inferiore al 50% con media pari al 68%. E' dunque necessario prevedere un'adeguata protezione al piede, che non deve essere troppo elevata (quanto a livello di cresta) per non dissipare energia ma deve al contempo garantire la stabilità della struttura. Si può ottenere una buona rappresentazione del coefficiente K_r utilizzando formule di letteratura (*Zanuttigh & Van der Meer*, 2008) con appositi accorgimenti per tenere conto della pendenza nella zona di risalita e della perdita d'acqua nei serbatoi, come eq. (6) e eq. (7).

7 BIBLIOGRAFIA

- Aalborg University, 2007b. WaveLab 2 homepage. <http://www.hydrosoft.civil.auc.dk/wavelab>.
- Kofoed, J.P., "Wave Overtopping of Marine Structures - Utilization of Wave Energy", 2002
- Mansard E. and E. Funke, The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. Proc. 17th Int. Conf. on Coastal Eng., Sydney, 1, 154–172.
- Margheritini, L., Vicinanza, D., Kofoed, J. P. 2009. Overtopping performance of Sea wave Slot cone Generator, Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, Edinburgh.
- Oumeraci H., Schüttrumpf H., Blech M., October 1999. Wave overtopping at Seadikes - Comparison of Physical Model Tests and Numerical Computations. OPTICREST Research Report on tasks 3.5 and 5.
- Sumer, M., Fredsøe, J., Lamberti, A., Zanuttigh, B. Diken, M., Gislason, K., Di Penta, A. Local scour and erosion around low-crested structures, Coastal Eng., 52 (10-11), 995-1025, 2005.
- Takahashi, S., Hosoyamada, S., Yamamoto, S., 1994. Hydrodynamic characteristics of sloping top caissons. Proc. of Int. Conf. on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, Port and Harbour Research Institute, Japan, vol 1, pp. 733–746.
- Van der Meer, J.W., K. d'Agremond and E Gerding. Toe Structure Stability of Rubble Mound Breakwaters. Proc. of the Advances in Coastal Structures and Breakwaters Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, 308-321, London, UK, 1995.
- Van Der Meer J., Janssen J.P.F.M. "Wave run-up and wave overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical structures". Ed.n. Kobayashi and Z. Demirebilek, 1995
- Vicinanza, D., Kofoed, J. P. & Frigaard P. Wave pressures on Seawave Slot-cone Generator, XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, 2006.
- Vicinanza, D., Margheritini, L., Contestabile, P., Kofoed, J. P., Frigaard, P. (2008). "Seawave Slot-cone Generator: an innovative caisson breakwaters for energy production", Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany.
- Vicinanza, D. and Frigaard, P. 2008. Wave pressure acting on a seawave slot-cone generator, Coastal Engineering, vol. 55, 553–568.
- Zanuttigh B. and J.W. Van der Meer, 2008. Wave reflection from coastal structures in design conditions. Coastal Engineering, Elsevier, 55 (10), 771-779.
- Zanuttigh, B., Margheritini L., Gambles, L. & L. Martinelli, 2009. Analysis of wave reflection from wave energy converters installed as breakwaters in harbours, Proc. EWTEC 2009.